DOI: 10.5846/stxb201608111651
郭兵,姜琳,罗巍,杨光,戈大专.极端气候胁迫下西南喀斯特山区生态系统脆弱性遥感评价.生态学报,2017,37(21):7219-7231.
Guo B, Jiang L, Luo W, Yang G, Ge D Z. Study of an evaluation method of ecosystem vulnerability based on remote sensing in a southwestern karst mountain area under extreme climatic conditions. Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7219-7231.

极端气候胁迫下西南喀斯特山区生态系统脆弱性遥感评价

郭 兵[1,2],姜 琳[1,*],罗 巍[3],杨 光[4],戈大专[3]
1 山东理工大学建筑工程学院,淄博 255000
2 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室,武汉 430079
3 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101
4 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101

摘要:全球气候变暖导致极端天气事件频发,针对西南喀斯特山区的特殊地理国情(水土流失和石漠化严重),引入了大尺度景观格局指数(香农均匀性指数和蔓延度指数)和极端气候指数(极端高温日数、极端低温日数和极端降雨日数),构建了生态系统脆弱性遥感评价体系,进而分析和探讨了该地区近 13 年的生态系统脆弱性时空变化格局和驱动机制,研究结果表明:西南喀斯特山区的生态系统则属于轻-中度脆弱,其分布格局表现为以川滇黔为核心向周边减小的趋势。2000—2013 年,西南喀斯特山区的生态系统脆弱性表现为先增加后减小的趋势。近 13 年西南喀斯特山区的生态系统脆弱性时空变化格局受人类活动(不同产业 GDP 和人口密度)、降水、地形地貌、水土流失、石漠化等因素影响较为显著。本研究可以为西南喀斯特山区的生态系统保护及生态环境的恢复与治理提供决策依据和技术支持。

关键词:生态系统脆弱性;动态监测;遥感;西南喀斯特山区;极端气候

Study of an evaluation method of ecosystem vulnerability based on remote sensing in a southwestern karst mountain area under extreme climatic conditions

GUO Bing[1,2], JIANG Lin[1,*], LUO Wei[3], YANG Guang[4], GE Dazhuan[3]
1 *School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*
2 *Key Laboratory for National Geographic Census and Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan* 430079, *China*
3 *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
4 *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

Abstract: During the past several decades, extreme weather conditions have become frequent because of global warming. This study introduces a large-scale landscape pattern index (Shannon uniformity index and contagion index) and extreme climate index (extreme high/low temperature days and extreme precipitation days) to establish an evaluation system for the ecosystem's vulnerability, considering the unique geographical conditions (serious soil erosion and rocky desertification) in the karst mountain region of Southwest China. Next, the spatial and temporal changes in the ecosystem's vulnerability during the past 13 years were analyzed and discussed. The results indicated that the ecosystem vulnerability in the karst mountain regions belonged to the mild-moderate level, which decreased from the Sichuan-Yunnan-Guizhou zones to the marginal zones. The severe and extreme vulnerable zones were mainly distributed in the central and northern areas because of severe

基金项目:地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(2016NGCM02); 山东理工大学教学研究与改革项目(116205);山东省自然科学基金(ZR2014DL001); 国家自然科学基金项目(41501425)
收稿日期:2016-08-11; **网络出版日期:**2017-07-11
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: linlin20061998@126.com

karst rocky desertification, low vegetation coverage, and intensive disturbance due to human activity. Conversely, the slight and mild vulnerable zones were mainly distributed in the southeastern and southwestern areas because of the high vegetation coverage, abundant precipitation, and lower disturbance due to human activity. From 2000 to 2013, the ecosystem vulnerability in the southwestern karst mountain areas increased at first and then decreased. Zones of moderate and severe increases in vulnerability were mostly concentrated in the northeastern portion of the study region, whereas zones of moderate and severe decreases were mainly distributed in the northwestern part. During the past 13 years, the temporal and spatial patterns of the ecosystem's vulnerability changes were significantly affected by human activities (different industrial GDP and population density), precipitation, topography, soil erosion, and rock desertification. This research can provide a decision-making foundation and technical support for protection of the ecosystem and restoration of the ecological environment in the karst mountain regions of Southwestern China.

Key Words: ecosystem vulnerability; dynamic monitoring; remote sensing; southwestern karst mountain area; extreme climate

20 世纪以来,以全球变暖为主要特征的全球气候与环境发生了巨大变化,生物多样性丧失、极端天气事件频发、环境退化、海平面上升正是对生态环境变化的强烈反馈,对人类的生存和社会经济的可持续发展构成了极大的威胁[1]。生态系统脆弱性研究作为全球环境变化及可持续性科学领域重要的分析工具,已经被许多国际性科学计划和机构(国际全球环境变化人文因素计划、政府间气候变化专门委员会、国际地圈生物圈计划等)提上了研究日程,成为生态环境和全球变化等学科领域关注的热点问题[2]。生态系统脆弱性的时空差异性是导致经济发展不平衡和贫富差距的重要原因之一,很大程度上影响了我国社会的和谐、可持续发展[3]。因此,开展生态系统脆弱性评价研究,深入剖析生态系统脆弱性的形成原因和驱动机制,为生态区的保护及生态环境的恢复与治理提供决策依据和技术支持,有利于实现生态区生态系统完整性的维护和人与自然的和谐发展,是贯彻落实科学发展观、牢固树立生态文明观念、促进经济社会可持续的必然要求[4]。

西南山区(四川、重庆、云南、贵州、广西)地形地貌复杂多样,喀斯特地貌分布广泛,地质灾害频发,属于典型的生态系统脆弱区[5]。该地区集"老""少""边""山""穷"于一体,有壮苗布依侗等 34 个少数民族,贫困人口相对集中,人地矛盾非常突出,当地居民为了生存,不得不掠夺式的开发自然资源,导致严重的水土流失、石漠化等生态环境问题,从而陷入"环境脆弱-贫困-掠夺资源-环境退化-进一步贫困"的恶性循环[6]。因此揭示西南山区的生态系统脆弱性对于山区生态环境保护和科学合理的开发具有重要的指导意义。

当前国内学者针对不同地区的生态环境特征采用不同的评价方法开展了大量研究[7]。刘振乾等[8]建立了三江平原湿地生态系统脆弱性评价指标体系,并运用综合指数方法对三江平原的湿地生态系统脆弱性程度进行了评价。姚建等[9]借助模糊数学聚类分析方法分析了岷江上游流域生态环境的空间分布规律。孔博等[10]构建了汶川地震灾区生态系统脆弱性指标体系,利用 DARE 法对地震灾区生态系统脆弱性进行了评价。李平星和樊杰[11]以广西西江经济带为例,采用 VSD 模型,通过暴露度、敏感性和适应能力分解脆弱性,构建包含自然和人为因素的 25 个指标体系,开展脆弱性评价与分区。李阳兵等[12]从西南岩溶山地脆弱性的成因出发,探讨性地将该区的脆弱性划分为三类:基底性脆弱、界面性脆弱、波动性脆弱。张笑楠等[13]基于景观结构信息对桂西北喀斯特区域(广西环江县)的生态环境脆弱度进行评价, 分析了研究区生态环境脆弱度的空间分布特征。何冬晓[14]以重庆岩溶地区为例,对该区的岩溶生态环境脆弱性进行深入的分析,并对研究区的生态重建技术进行探讨。张殿发等[15]揭示了贵州省脆弱生态环境的表现形式,并从季风活动、人口压力、大气环流以及社会经济压力等方面分析了研究区脆弱生态环境的成因。针对西南山区,不同的学者针对不同的研究区和研究尺度所构建的脆弱性评价体系相差较大,当前还缺少一个系统、规范的评价体系。

近年来全球气候变暖加剧,极端气候频发,已对西南山区生态环境产生深刻的影响。本研究针对西南喀斯特山区特殊的地理国情(水土流失和石漠化严重),引入了大尺度景观格局指数和极端气候指数,构建了生

态系统脆弱性遥感评价体系，并分析和探讨了该地区近 13 年的脆弱性时空变化格局及其驱动机制，以期为后续针对西南山区脆弱性开展的中小尺度研究提供技术参考。

1　研究区与研究方法

1.1　研究区概况

西南喀斯特山区包括贵州、四川、云南、重庆及广西 5 省（市、自治区），山地和高原分布广泛，占总面积的 80%。西南喀斯特山区景观异质性强，地质背景特殊，岩溶作用强烈，崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害密集分布，生态环境容量小，生态环境本底十分脆弱[16]。尖锐的人地矛盾(众多的人口，长期的资源无序开发)导致水土流失和植被破坏日益严重，产生了严重的石漠化现象，且呈不断扩张的趋势，极大地制约了该区域生态保护和可持续发展。该地区分布有 34 个少数民族，其少数民族人口占总人口的 19%左右，西南喀斯特山区的社会经济发展总体水平较为落后，贫困人口占全国贫困人口总量的近 50%[17]。

1.2　研究方法

1.2.1　综合指数法

当前针对生态环境脆弱性的研究多采用分级赋权重评价模型[5,8]，该方法对选取的各脆弱性评价因子分等级用于评价，这种方法适用于大尺度的宏观研究，而且如果脆弱性评价因子选择科学合理的话，结果也是比较理想的。但是考虑到不同的分级方案对最终的脆弱性评价结果的影响较大，并且分级方案的主观性很强，为了避免指标分级过程中人为因素的过多干扰，本文采取一级指标分级赋权重加权而二级指标归一化赋权重加权求和两种评价模型进行综合研究，以上两种评价模型的公式一致，如下：

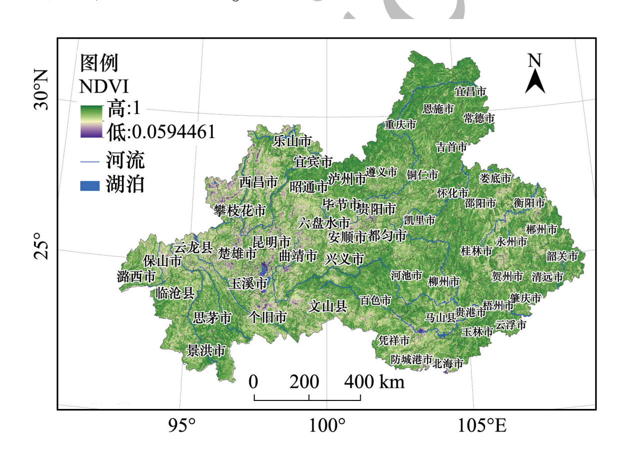


图 1　研究区及其植被分布概况

Fig.1　The location of the southwest Karst mountain area and the average NDVI in growing season for 2000—2013

$$\mathrm{ESVI} = \sum_{i=0}^{n} I_i \times \omega_i \tag{1}$$

式中，ESVI(Eco-system Vulnerability Index)为生态系统脆弱性指数；I_i为第 i 个归一化指标(或分级指标)；ω_i为第 i 个指标权重；n 为指标个数。

归一化方法：

正向指标
$$I_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{2}$$

逆向指标
$$I_i = \frac{I_{\max} - I_i}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{3}$$

其中，I_i为脆弱性评价指标 I 的归一化值；$I_{\min}$为 I 指标的最小值；$I_{\max}$为 I 指标的最大值。I_i越大，说明脆弱性指标对脆弱性影响越显著，脆弱性值越大；反之则越小。

1.2.2　气候倾向率

气候趋势系数主要反映各气候因子长期趋势变化的方向和程度，其计算方法为 n 个时刻的气候因子与自然数 1，2，3，…，n 的相关系数[12]。其计算公式如下：

$$r_{xt} = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (i - \bar{t})^2}} \right| \tag{4}$$

式中，r_{xt}为趋势系数绝对值；x_i为气候因子 i；$\bar{x}$ 为气候因子 i 的多年平均值；n 为时间序列数；$\bar{t}$ 为$(n+1)/2$。r_{xt}

越大则表明相应的气候因子年际变化越剧烈。

气象要素的趋势变化的一次线性方程为：

$$\vec{p}_t = a_0 + a_1 t \quad t = 1,\ 2, \cdots, n \tag{5}$$

$$\frac{d\,\vec{x}_t}{dt} = a_1 \tag{6}$$

式中，$a_1 \cdot 10$ 成为气候倾向率，单位为某要素单位/10a。根据线性回归理论得：

$$a_1 = r_{xt}\frac{\rho_x}{\rho_t} \tag{7}$$

式中，ρ_x 是要素 x 的均方差，ρ_t 为数列 $1,2,\cdots,n$ 的均方差，这样就可以从趋势系数 r_{xt} 计算出气候倾向率。

2 评价指标及数据源

本研究根据西南喀斯特山区的生态环境特征，结合《国家主体功能区规划实施方案》、《生态环境状况评价技术规范（试行）》以及生态系统服务功能评估方案，同时考虑到指标获取的可操作性和关联性，本文从水体、气候、植被、土壤和人文五个方面选取指标构建了评价体系（图 2）。

（1）水体 水体因子包括水资源量和水网密度。

水资源量和水网密度作为评价水体生态脆弱性的指标，在生态系统中具有重要的生态支持功能，因此水资源量在脆弱性评价中是逆向指标。公里格网水资源量（2005 年）由水利部提供，2000、2010 和 2013 年水资源量数据是根据全国各省市水资源统计数据和格网水资源量（2005 年）加权计算得到。水网密度在生态系统中具有重要的生态支持功能，因而水网密度在生态系统脆弱性评价中为逆向指标，该数据是利用研究区土地利用遥感监测数据中的河流、湖泊、水库、沼泽、冰川积雪等土地覆被类型在公里格网中的面积百分比确定水网密度值。土地利用遥感监测数据采用中国科学院遥感与数字地球研究所（2000 年、2005 年、2010 年）和国家自然资源和地理空间基础信息库项目办公室（2013 年）提供的中国土地利用遥感监测数据集（1 km×1 km）。

（2）植被 植被因子包括净初级生产力（Net Primary Productivity，NPP）、生物丰度指数和大尺度景观格局指数

NPP 和生物多样性指数是整个生态系统正常运作的基础，直接影响生态系统本身的功能，因此植被净初级生产力在脆弱性评价中为逆向指标。本研究 NPP 使用 MOD17A3 数据产品，该数据集的时空间分辨率分别为 1 km 和 1 年。该数据可以从 Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System（LAADS）官方网站免费下（https://lpdaac.usgs.gov/products）。生物多样性是人类生存和发展的物质基础，该指数在脆弱性评价中为逆向指标，主要参考环保部生物多样性计算公式获取。大尺度景观格局指数主要反映景观形态特征和空间结构对人类和生物的影响，在脆弱性评价中为逆向指标。本研究基于 ArcGIS 10.2 和 Fragstats 3.4 利用 MODIS 土地利用覆被数据获取了相关景观格局指数：香农均匀性指数（Shannon′s Evenness Index，SHEI）和蔓延度指数（Contag index，CONTAG）。

（3）气候

20 世纪以来，全球气候变暖日益加剧，全球生态环境发生了重大变化。极端天气频发、生物多样性丧失、全球海平面上升、生态环境退化对人类的生存发展和社会、经济的可持续发展产生了严重的威胁[18]。全球变暖正在直接或间接地对自然和社会、人文生态系统产生影响。本研究中从气候本底特征和全球气候变暖背景下的极端天气事件两个方面选取了 7 个指标：年平均降水量（逆向）、>10℃积温（逆向）、干燥度（正向）、日照时数（逆向）、极端高温日数（正向）、极端低温日数（正向）、极端降雨日数（正向）。

（4）土壤

考虑到西南喀斯特山区特殊的地理国情和生态环境特征，本研究在体系构建中选取了水力侵蚀和石漠

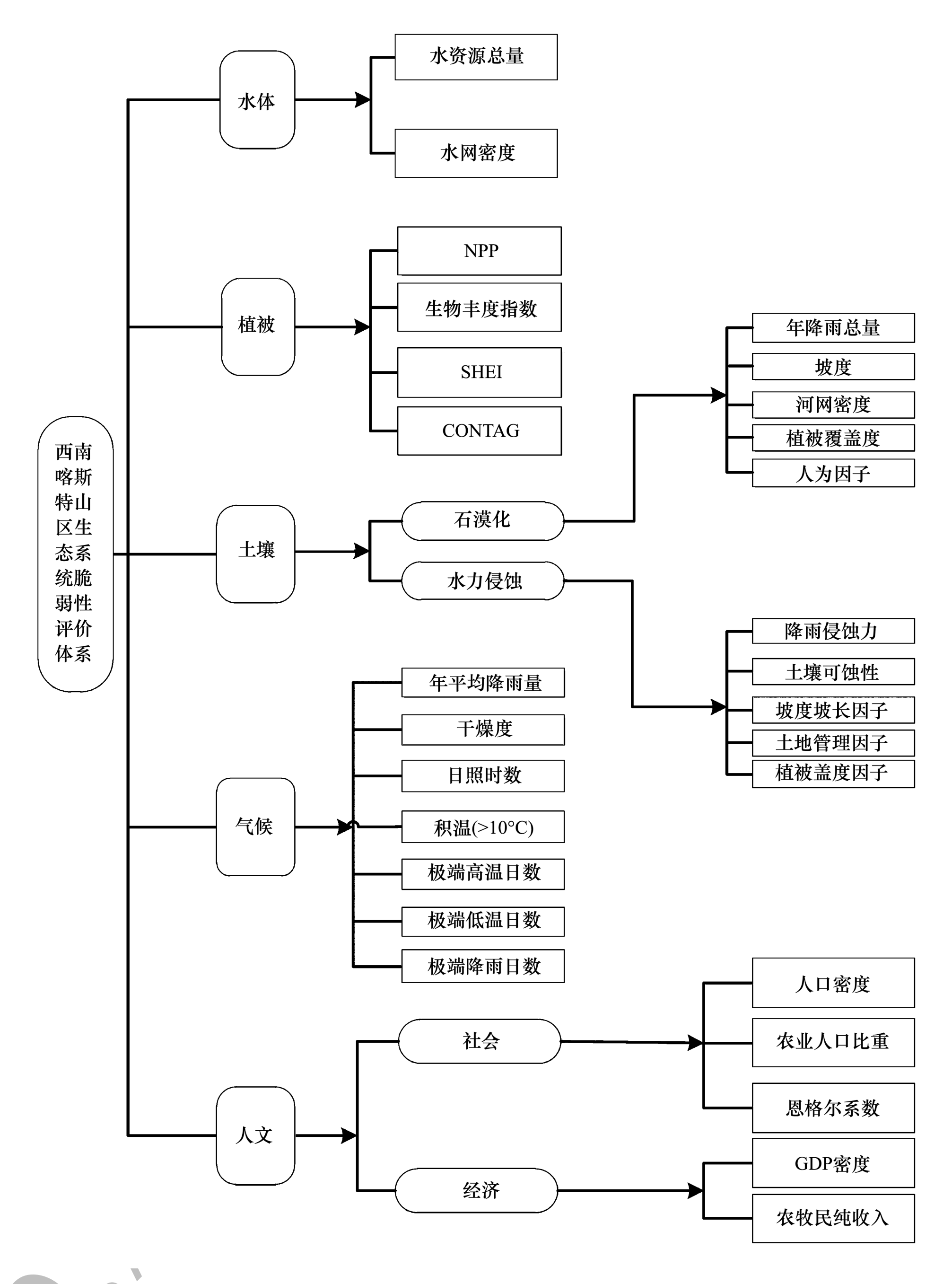


图 2　生态系统脆弱性评价体系

Fig.2　Evaluation system of ecosystem vulnerability

化。石漠化是湿润喀斯特地区特有的、在脆弱的喀斯特地质基础上形成的一种土地荒漠化生态现象,是由于在人类不合理经济活动加上脆弱的生态地质环境背景综合作用下,植被退化,岩石大面积裸露,呈现类似荒漠景观的土地退化现象[13]。水力侵蚀指以地表水为主要侵蚀营力的土壤侵蚀类型。水力侵蚀造成地表切割破碎、自然植被退化、生物多样性破坏、土地质量下降、生态功能衰退等环境问题,引起巨大的经济损失。因此水力侵蚀和石漠化在脆弱性评价中为正向指标。

(5)人文

人文因素一定程度上制约区域生态系统的健康状况,本研究中人文因子包含人口密度(正向)、GDP 密度(正向)、农业人口比重(正向)、恩格尔系数(正向)、农牧民人均纯收入(逆向)指标。其中人口公里格网数据(人口密度)、GDP 公里格网数据(GDP 密度)来源于中国科学院遥感与数字地球研究所(2000 年、2005 年、

2010 年)和国家自然资源和地理空间基础信息库项目办公室(2013 年),该数据是基于土地利用遥感监测数据和夜间灯光数据、统计数据反演获取。

3 结果与分析

通过查阅大量参考文献[5-15]并结合部分专家意见和野外实地调查数据,确定了本研究中一级(表 1)和二级指标的权重值。基于西南喀斯特山区生态系统脆弱性评价体系各级指标权重和一级指标分级表(表 2),本研究利用 ArcGIS 10.2 的栅格计算器计算获取了西南喀斯特山区生态系统脆弱性(ESVI)值。

表 1 一级指标权重

Table 1 Index weight of first level

一级指标 First level index	水体 Water	气候 Climate	植被 Vegetation	土壤 Soil	人文 Human	权重 Weight
水体 Water	1	1	1	1/2	1	0.16
气候 Climate	1	1	1/2	1/2	1	0.15
植被 Vegetation	1	2	1	1	2	0.25
土壤 Soil	2	2	1	1	3	0.31
人文 Human	1	1	1/2	1/3	1	0.13

表 2 一级指标脆弱性分区阈值

Table 2 Thresholds of first level index

分级标准 Classification criteria		微度脆弱 Slight	轻度脆弱 Mild	中度脆弱 Moderate	重度脆弱 Intensive	极度脆弱 Severe
非土壤 Non-soil	水体 植被 气候 人文	<0.45	0.45—0.51	0.51—0.56	0.56—0.61	>0.61
土壤 Soil	石漠化	<0.29	0.29—0.35	0.35—0.40	0.40—0.47	>0.47
	水力侵蚀	<500	500—2500	2500—5000	5000—8000	>8000
分级赋值 Hierarchical assignment		1	2	3	4	5

3.1 生态系统脆弱性评价结果对比分析

参考西南喀斯特山区的生态环境特征及生态系统脆弱性(ESVI)值直方图分布和标准差,将生态系统脆弱性值分为五级:微度脆弱(ESVI≤3.30)、轻度脆弱(3.30<ESVI≤4.4)、中度脆弱(4.4<ESVI ≤4.5)、重度脆弱(4.5< ESVI ≤4.7)、极度脆弱(ESVI≥4.7)。西南喀斯特山区 2000、2005、2010 和 2013 年的脆弱性分级如图所示(图 3)。

研究结果(图 3)发现:西南山地喀斯特石漠化生态区重度和极度脆弱区主要集中分布于中部和北部,主要原因是该地区岩溶发育强烈,植被覆盖度低,水土流失严重,大量岩石裸露,加上该地区成土过程缓慢,土层浅薄,生态系统自身恢复能力差,此外该地区生产力水平低,贫困人口多,环境保护意识差,人类活动干扰强度大。微度和轻度脆弱区则主要分布于该地区的东南部和西南部,东南部地区降水充沛,植被覆盖度高,水土流失和石漠化强度较低,加上人类的生态保护措施(退耕还林等),生态环境较好。

通过图 4 中面积及面积百分比的对比分析发现:2000—2005 年,西南山地喀斯特生态区的生态系统脆弱性有一定程度的加剧,主要表为 2005 年该地区的总体 ESVI 值为 3.37 相比 2000 年 ESVI 值 3.21 略有增加,重度和中度脆弱区的面积有一定幅度的增加,分别为 4.51 万 km^2 和 2.05 万 km^2,而微度和轻度脆弱区面积减小,分别为 6.1 万 km^2 和 0.04 万 km^2;2005—2010 年,西南山地喀斯特生态区的生态系统脆弱性总体表现稳定,局部有一定程度的减小,主要表现为 2010 年研究区总体 ESVI 值为 3.31 相比 2005 年 3.37 基本保持稳定,

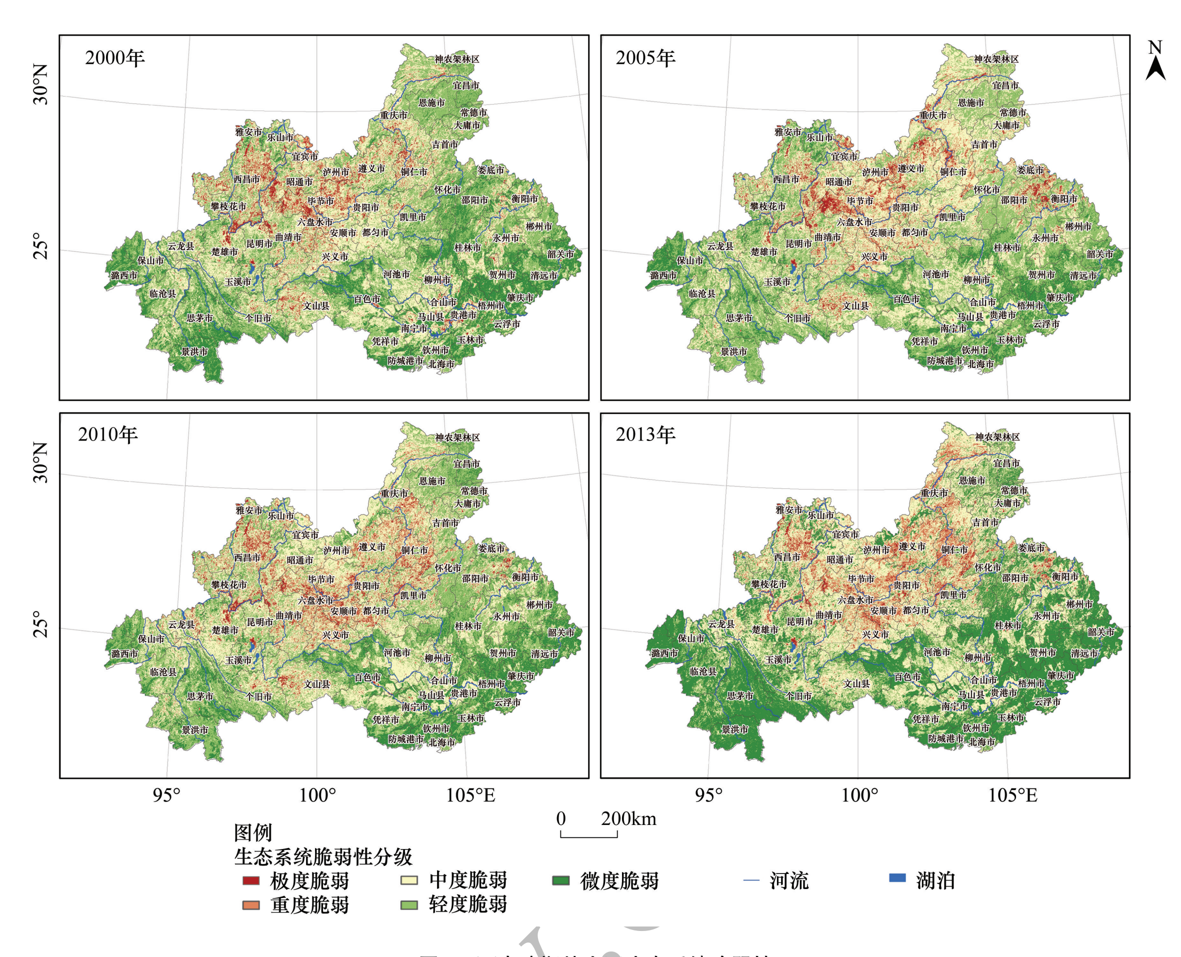


图 3　西南喀斯特山区生态系统脆弱性

Fig.3　Ecosystem vulnerability of southwest Karst mountain area

微度脆弱区面积增加,轻度和中度脆弱区面积相应减小,而极度脆弱区面积则有一定幅度的增加;2010—2013 年,西南山地喀斯特生态区的生态系统脆弱性总体稳定,局部改善,主要表现为微度脆弱区面积减小(13.63 万 km^2)而重度和极度脆弱区面积增加(0.18、1.61万 km^2)。2000—2013 年,西南山地喀斯特生态区的生态系统脆弱性总体稳定,局部恶化,表现为中度和极度脆弱区面积减小,分别为 1.06、1.55 万 km^2,微度脆弱区则有一定幅度的增加,为 9.67 万

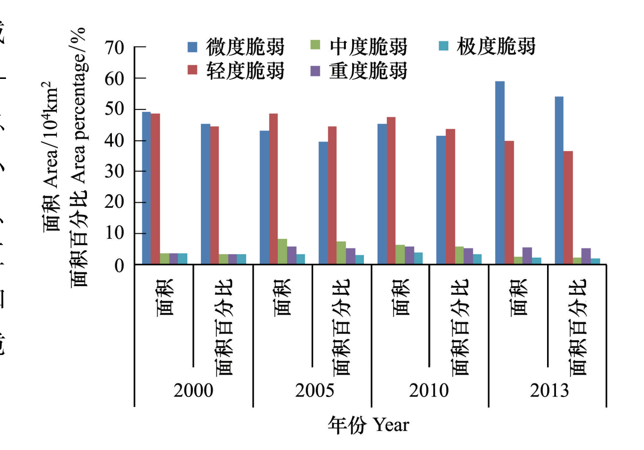


图 4　西南喀斯特山区近 13 年不同等级脆弱性面积对比

Fig.4　Area comparisons of different grades of ecosystem vulnerability

3.2　生态系统脆弱性变化强度分析

为了进一步分析近 13 年西南喀斯特山区的生态系统脆弱性变化,本小节利用 ArcGIS 10.2 的栅格计算器对 4 期生态系统脆弱性值进行计算,获取了 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2013 年和 2000—2013 的 4 期脆弱性动态监测图。并根据脆弱性动态变化值的直方图分布和标准差,对四期脆弱性变化值(Change intensity,CI)进行了分级:重度减小区($CI \leq -1$,中度减小区($-1 < CI \leq -0.5$),稳定区($-0.5 < CI \leq 0.5$),中度增加区($0.5 < CI \leq 1$),重度增加区($CI > 1$)。研究结果发现:2000—2005 年(图 5),西南喀斯特山区的脆弱性中度和重度增加区主要分布于该区的东北部,如邵阳市、娄底市、宜昌市、恩施市、常德市等和西南部,如思茅市、景洪

市等以及零散分布于中部地区,如遵义市、安顺市、曲靖市、邵通市、凯里市等。中度和重度减小区则主要集中于该区的西北部,如雅安市、乐山市、西昌市、攀枝花市等和东南部,如北海市、钦州市,凭祥市等。稳定区分布面积最广,主要分布于中部地区各县市。以上脆弱性变化分布格局,主要取决于降水、地质灾害、土地利用结构的改变、水力侵蚀、石漠化、人类活动等因素。2005—2010 年(图 5),西南喀斯特山区的生态系统脆弱性中度和重度增加区主要分布于该区的西北部,如乐山市、攀枝花市、保山县、云龙县、潞西市等。重度和中度减小区则主要分布于东北部,如神农架地区、宜昌市、娄底市、大庸市等和北部地区,如重庆市、泸州市、邵通市等以及中部地区,如河池市北部、兴义市等。稳定区分布面积最广,主要分布于中、南部各县市。该脆弱性变化空间格局同样受气候、地质灾害、人类活动(粗放耕作、刀耕火种、毁林开荒、退耕还林、退耕还草等)。2010—2013 年(图 5),该生态区的生态系统脆弱性稳定区分布面积最广,重度和中度增加区分布面积较小,零散分布于贵阳市、百色市、河池市,而脆弱性重度和中度减小区则主要分布于该区的西部和南部,如临沧市、景洪市、昆明市、思茅市、个旧市、凭祥市等。2000—2013 年(图 5),西南喀斯特山区的生态系统脆弱性表现为先增加后减小的趋势,旱灾、暴雨、地质灾害、水土流失、石漠化和人类活动(人口数量的急剧增加、粗放耕作、刀耕火种、广种薄收、坡地开荒、毁林开荒、放火烧山)是造成该地区生态系统脆弱性加剧的主要原因,而气候、植被、政府干预(退耕还林、退耕还草)等因素则导致该地区生态系统状况的改善。

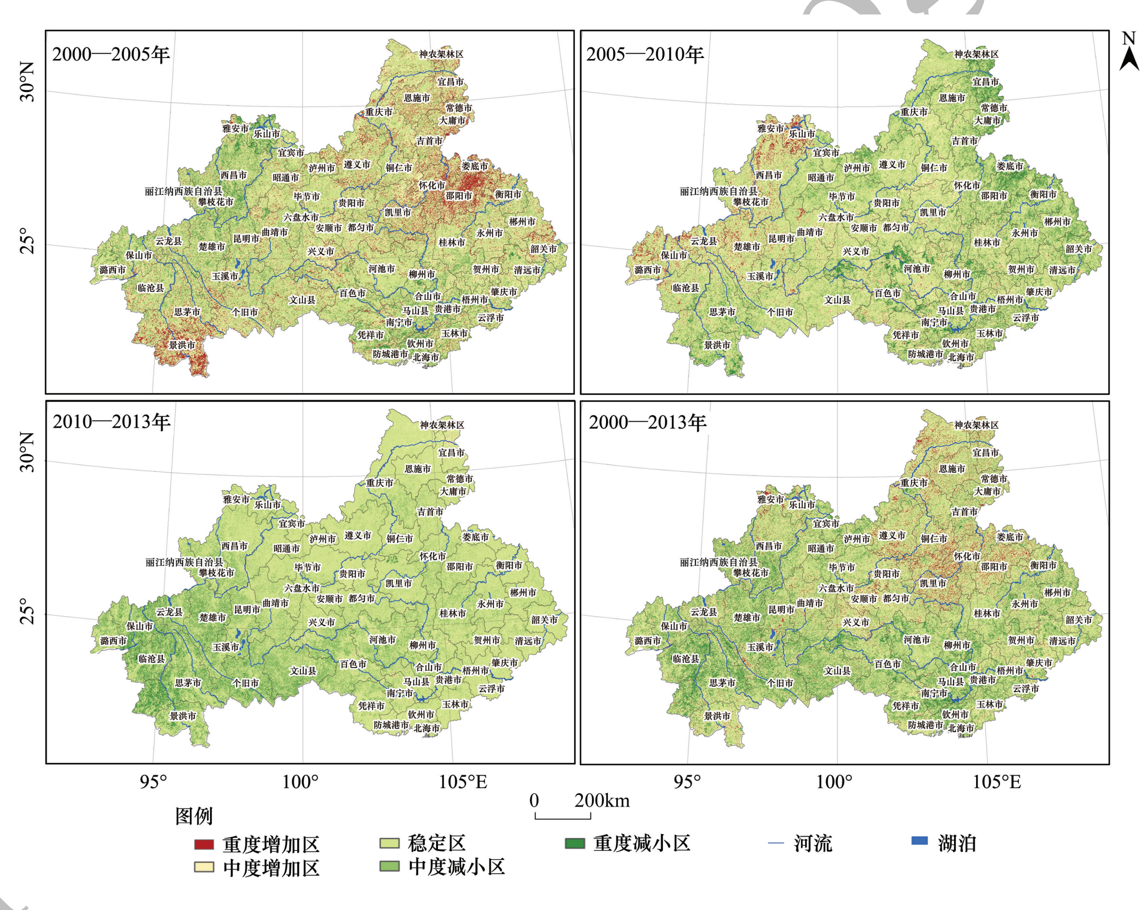


图 5 西南喀斯特山区生态系统脆弱性变化

Fig.5 Change intensity of ecosystem vulnerability

4 讨论

本研究从气温、降水、GDP 密度以及人口密度 4 个方面分析和探讨了西南喀斯特山区近 13 年的生态系统脆弱性时空变化驱动机制,数据分析在 SPSS 17.0 中进行,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$,相关图表制作在 Excel 中完成。

4.1　气温对生态系统脆弱性变化的影响

气温气候倾向率能够反映气温的变化方向和强度,气温的变化与区域生态环境脆弱性有较大的相关性。为了更深入的分析探讨气温变化对生态系统脆弱性变化的影响,本节基于 2000—2013 年近 13 年的气象站点数据统计和分析了气温气候倾向率与生态系统脆弱性均值(2000、2005、2010 和 2013 年四期脆弱性值的平均值)及其变化强度(2000—2013 年脆弱性变化强度)的相关性。图 6 显示生态系统脆弱性值受气温变化影响不敏感,原因在于该地区地处热带和亚热带,气温背景值较高,气温增幅相对不显著,加上该地区降水充沛,地形复杂多样,山区立体气候类型显著,因此气温的增加对西南山区的生态系统影响不明显。图 6 显示了生态系统脆弱性变化强度与气温气候倾向率的相关性,结果发现:西南喀斯特山区的生态系统脆弱性随着温度的上升而增大,但是脆弱性变化强度随着气温气候倾向率的增大变化不大。

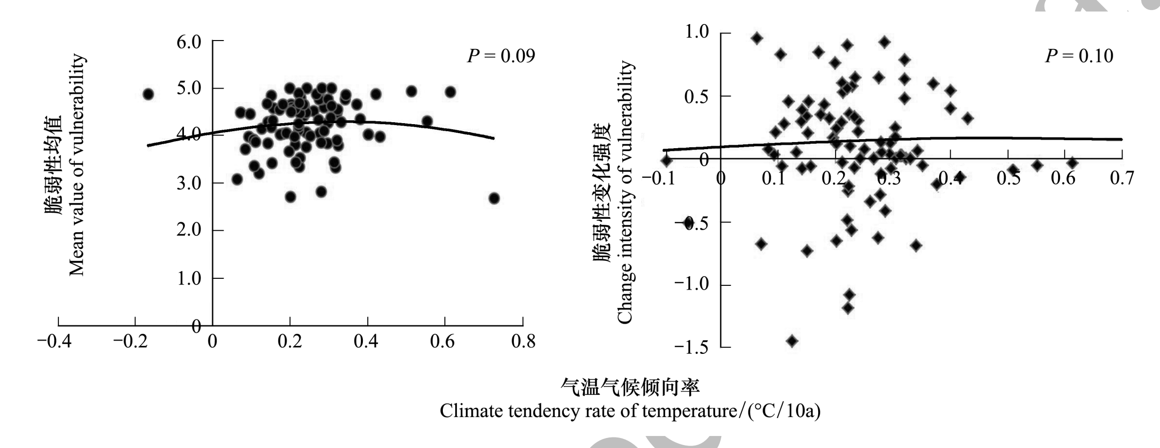


图 6　年均气温气候倾向率与近 13 年平均脆弱性值和脆弱性变化强度的相关性

Fig.6　Relations between temperature climate tendency rate and the average vulnerability and change intensity

4.2　降水对生态系统脆弱性变化的影响

降水气候倾向率能够反映区域降水的变化方向和强度,降水量的波动能够较大的影响生态系统的稳定性。为了深入的探讨降水变化强度对生态系统脆弱性变化的影响,本小节基于 2000—2013 年近 13 年的气象站点数据统计和分析了降水气候倾向率与生态系统脆弱性均值(2000、2005、2010 和 2013 年 4 期脆弱性值的平均值)及其变化强度(2000—2013 年脆弱性变化强度)的相关性。图 7 显示近 13 年生态系统脆弱性平均值与降水气候倾向率的相关性:生态系统脆弱性随着降水气候倾向率的增大而呈现轻微增大。图 7 则显示了近 13 年生态系统脆弱性变化强度与降水气候倾向率的相关性:总体上脆弱性变化强度随着降水气候倾向率的增加而增加。以上变化格局主要原因在于西南喀斯特地区复杂的水文过程。一方面,由于该地区岩溶发育强烈,在雨水溶蚀作用下岩石不断被风化,形成落水洞、溶隙、溶洞、溶沟、地下河等地貌特征。因此降水入渗强度很大,入渗率高达 95%以上,大部分降水被入渗地下。在这种复杂的地下环境下,使地下水很难被利用,导致在岩溶地区表现出“湿润条件下干旱”。另一方面,表层土壤随雨水垂直下渗,加上表层土壤浅薄疏松、持水能力较差,土壤层较高的碎石含量和岩溶管道、裂隙的存在使水分运移过程具有高度空间异质性,进而加剧了水土流失和石漠化进程。此外,西南山区地形破碎,起伏度较大,降水集中,急剧增加的降水往往表现为暴雨或大暴雨,因此会加剧山洪、滑坡、泥石流、山地崩塌等自然灾害的强度和频次。

4.3　不同产业 GDP 对生态系统脆弱性变化的影响

社会经济状况包括非常广泛和复杂的内容,在一定程度上影响着生态系统状况及其变化。国内生产总值(Gross domestic product,GDP)作为社会经济的一个重要指标,能够反映地区经济实力和开发强度,而不同产业的 GDP 密度则反映了该地区的不同产业的开发方式及开发强度。本研究分别探讨了近 13 年西南喀斯特山区生态系统脆弱性平均值(2000、2005、2010 和 2013 年四期脆弱性值的平均值)与 GDP 密度、第一产业 GDP 密度、第二产业 GDP 密度以及第三产业 GDP 密度(万元/km^2)(2000、2005、2010 和 2013 年 4 期各产业

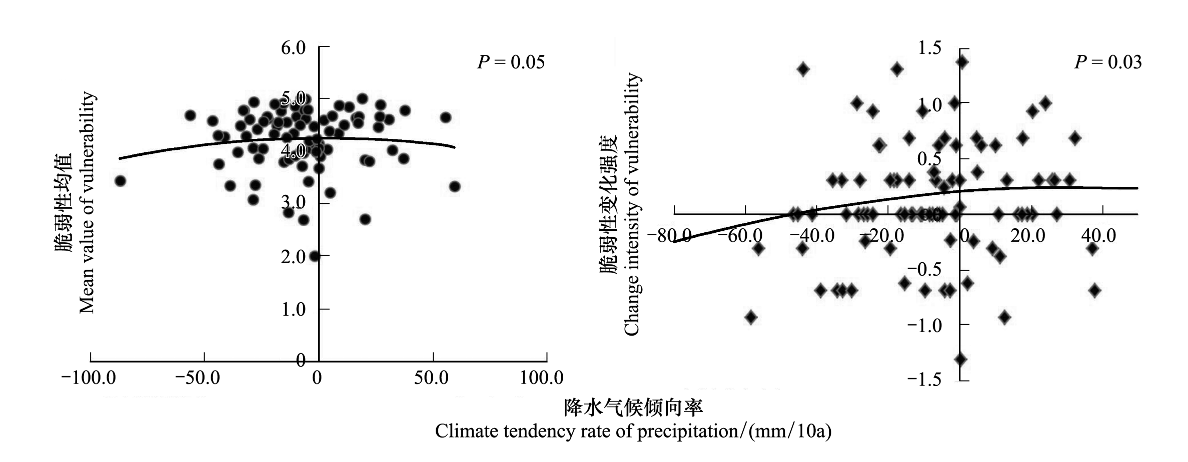


图 7 年降水气候倾向率与近 13 年平均脆弱性值和脆弱性变化强度的相关性

Fig.7 Relations between precipitation climate tendency rate and the average vulnerability and change intensity

GDP 的平均值)的相关性。

图 8 显示了近 13 年西南喀斯特山区生态系统脆弱性平均值与 GDP 密度(万元/km^2)的相关性(P=0.05),结果发现总体上两者的相关性趋势变化(曲线 c)可分为两个阶段:GDP 密度(万元/km^2)<1700 和 GDP 密度(万元/km^2)>1700。在 GDP 密度(万元/km^2)<1700 阶段,变化曲线又分为曲线 a 和曲线 b:曲线 a 反映的是生态系统脆弱性随着 GDP 密度(万元/km^2)的增加而减小,说明随着生态环境的改善,能够为人类的生存和发展提供更多的资源,GDP 密度(万元/km^2)会随之增加;曲线 b 则反映了生态系统脆弱性值随着 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增大,说明了随着人类开发强度的增加,对生态环境产生了一定的破坏,因此生态系统脆弱性值会随之增加。当 GDP 密度(万元/km^2)>1700 时,生态系统脆弱性则随着 GDP 密度(万元/

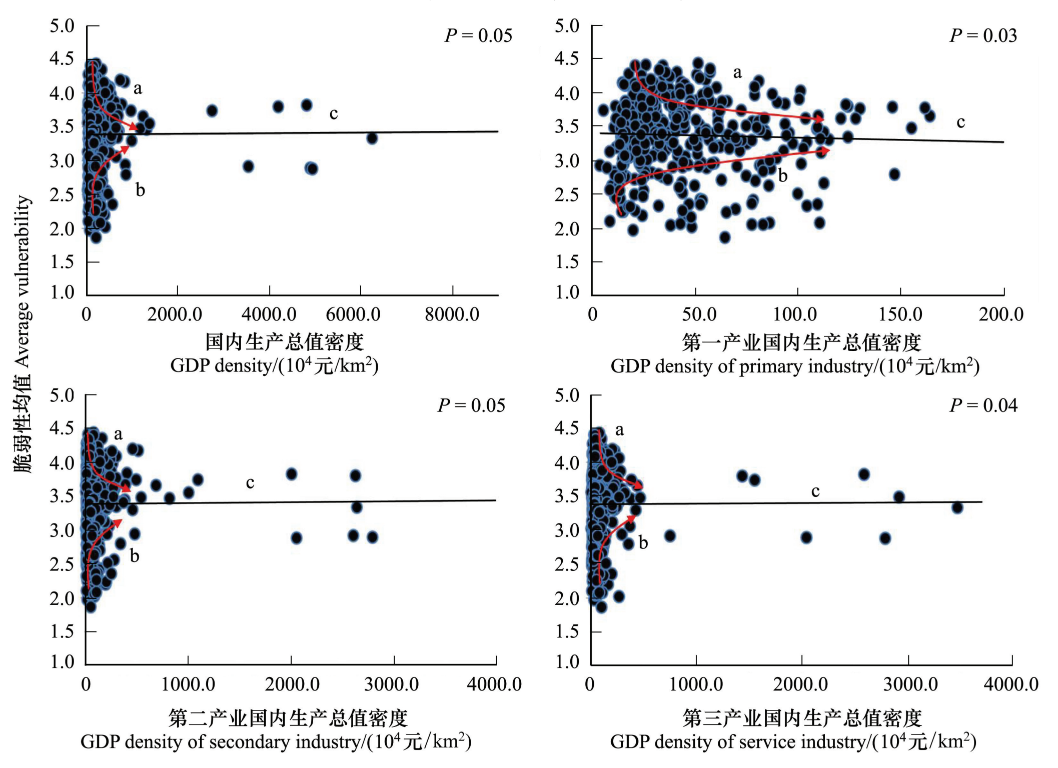


图 8 近 13 年不同产业 GDP 密度与平均脆弱性值的相关性

Fig.8 Relations between GDP density of different industries and the average vulnerability

km^2)的增加而增加,主要原因是人类的开发强度超出了生态环境承载能力和自我恢复能力,人类活动对生态环境的破坏作用显著。

图 8 显示了近 13 年生态系统脆弱性平均值与第一产业 GDP 密度(万元/km^2)的相关性(P =0.03),结果发现总体上两者的相关性趋势变化(曲线 c)可分为两个阶段:第一产业 GDP 密度(万元/km^2)<130 和第一产业 GDP 密度(万元/km^2)>130。在第一产业 GDP 密度(万元/km^2)<130 阶段,变化曲线可分为两种情况曲线 a 和曲线 b。曲线 a 反映的是生态系统脆弱性随着第一产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而减小,说随着生态环境的改善,如地表水资源、耕地资源、草地资源等增加,能够为人类的生存提供更适宜的环境,为农作物的生长提供更多的水资源和光照、积温,为畜牧业的发展提供更多的林草资源,因此第一产业 GDP 密度(万元/km^2)会随之增加;曲线 b 则反映了生态系统脆弱性值随着第一产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增大,说明了在生态环境较好的地区,如高山林地、河谷平原,随着人类开发强度的增加(过度放牧、陡坡开垦、环境污染),对区域生态环境产生了极大地破坏,石漠化、水土流失加剧,因此生态系统脆弱性值会随之增加。当第一产业 GDP 密度(万元/km^2)>130 时,生态系统脆弱性则随着第一产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增加,主要原因是喀斯特是一种脆弱的生态系统, 土地承载力低,环境容量小,抗干扰能力弱, 弹性小、阈值低,环境系统内物质的移动能力很强, 受干扰后的生态系统自恢复能力弱,恢复速度慢。此外,在脆弱的喀斯特生态环境背景上, 叠加人类不合理经济活动, 如人口增长过快, 森林乱砍盗伐, 陡坡地开荒等,共同导致了生态环境日趋恶化。

图 8 显示了近 13 年生态系统脆弱性平均值与第二产业 GDP 密度(万元/km^2)的相关性(P =0.05),结果发现总体上两者的相关性趋势变化(曲线 c):生态系统脆弱性随着第二产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增大。但是局部地区(第二产业 GDP 密度(万元/km^2)<800)的变化曲线可分为曲线 a 和曲线 b:曲线 a 反映的是生态系统脆弱性随着第二产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而减小,说明在生态环境较好的地区能够为第二产业的发展提供更多的生产基础资料,如水资源等和人力资源,因此 GDP 密度(万元/km^2)会随着生态环境的状况改善而增加;曲线 b 则反映了生态系统脆弱性值随着 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增大,说明了随着人类工业活动的加剧,会造成区域水环境污染、植被破坏、大气污染,对生态环境产生极大地破坏。此外,该地区矿产资源丰富,但是乡镇企业生产方式落后、管理水平低,开采方式很多是露天开采,而露天开采需要进行大量的表土剥离, 因而生产过程中对地貌景观和地表覆被造成严重破坏, 形成岩石裸露、土地荒芜、乱石遍地的矿业荒漠化土地, 加上在矿产开发中产生的“三废”都会对土地和植被资源造成的极大的破坏,因此导致生态环境日趋恶化。介于两个曲线之间的点则受以上因素的综合影响和制约,总体上表现为脆弱性值随着第二产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而减小。第二产业 GDP 密度>800 时, 生态系统脆弱性随着第二产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增大,这与西南山地喀斯特地区的第二产业的产业结构、第二产业发展过程中对矿产资源、水资源、森林资源等过度开发利用及其对水环境、大气环境(酸雨)、土地环境的破坏及污染相关。

图 8 显示了近 13 年生态系统脆弱性平均值与第三产业 GDP 密度(万元/km^2)的相关性(P =0.04),结果发现总体上两者的相关性趋势变化(曲线 c)可分为第三产业 GDP 密度(万元/km^2)<500 和第三产业 GDP 密度(万元/km^2)>500,在第三产业 GDP 密度(万元/km^2)<500 阶段,变化曲线可分为曲线 a 和曲线 b:曲线 a 反映的是生态系统脆弱性随着第三产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而减小,说明区域生态环境好的地区,气候宜人,人口密集,经济发达,基础服务设施完善,旅游业、服务业等产业结构完备,因此第三产业 GDP 密度(万元/km^2)表现为随着生态系统脆弱性的减小而增加;曲线 b 则反映了生态系统脆弱性值随着第三产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增大,主要原因是西南喀斯特地区由于特殊的地质、地貌环境,已形成了独具特色的旅游资源,集“ 清、秀、奇、巧、变”为一体的喀斯特自然风光同古朴的少数民族风情相融合,因此该地区旅游开发独具魅力,旅游业也日益成为带动第三产业发展的龙头。然而随着旅游资源的过度开发和人类活动的强烈干预,如旅游景区的基础设施建设、服务业相关设施的配置(道路修建等),均会对区域生态环境产生

一定程度破坏,因此生态系统脆弱性值会随之增加。而当 GDP 密度(万元/km^2)>500 时,生态系统脆弱性则随着第三产业 GDP 密度(万元/km^2)的增加而增加,主要原因是人类活动的过度干扰会对景区以及相关生态环境的自身恢复造成很大的压力以至超出了自然生态环境的承载能力,进而生态系统脆弱性增加。

4.4 人口密度对生态系统脆弱性变化的影响

人口是实现地区经济和社会可持续发展的基本条件之一，也是制约可持续发展的最根本因素,因此人口密度与区域生态环境质量有密切关系。西南山地喀斯特地区总人口超过 1 亿，居住着 48 个少数民族，是我国南方的主要贫困地区，全国近 1/2 的贫困人口集中于本区[14]。该地区农民环保意识淡薄以及落后的生产方式对自然生态系统破坏极大,但更主要的是人口的快速增长超过了土地的承载力，使这些地区陷入了人口增长-过度垦殖-生态恶化-经济落后-人口贫困-文化教育水平低-环保意识和人口意识淡薄-人口增加的恶性循环。

本小节以县级行政区为统计基本单元统计和分析了生态系统脆弱性均值(2000、2005、2010 和 2013 年 4 期脆弱性值的平均值)与人口密度(人/km^2)的相关性(2000、2005、2010 和 2013 年 4 年的人口密度均值)之间的相关性(P =0.05),结果(图 9)发现:近 13 年西南喀斯特山区的生态系统脆弱性平均值与人口密度(人/km^2)两者相关性趋势变化(曲线 c)可分为两个阶段:人口密度(人/km^2)<600 和人口密度(人/km^2)>600。在人口密度(人/km^2)<600 阶段,变化曲线可分为两种情况:曲线 a 和曲线 b。曲线 a 反映的是生态系统脆弱性随着人口密度(人/km^2)的增加而减小,说明区域生态环境的好的地区,气候宜人,水资源丰富,能够为人类的生存和发展提供更多资源,因此人口密度(人/km^2)随着生态系统脆弱性的减小而增加;曲线 b 则反映了生态系统脆弱性值随着人口密度(人/km^2)的增加而增大,说明了在生态环境较好的喀斯特地区,人口压力及对资源的不合理开采和利用，严重地造成动植物资源锐减、矿产资源极大浪费、土地资源退化、水资源短缺。人口与环境的对立关系使农业生态系统退化、土地质量变异和承载力降低,成为喀斯特地区经济社会可持续发展的瓶颈。介于两个曲线之间的点则受以上因素的综合影响和制约。在人口密度(人/km^2)>600 阶段表现为脆弱性值随着人口密度(人/km^2)的增大而增大,说明快速增长的人口数量超出了自然生态环境的资源承载能力和恢复能力,脆弱性值则随之而增大。

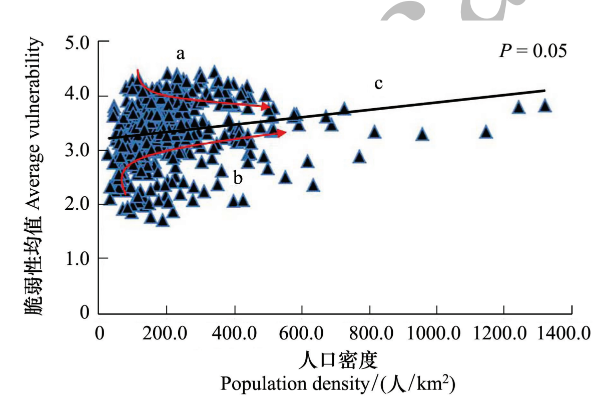


图 9 近 13 年平均人口密度与平均脆弱性值的相关性

Fig.9 Relations between population density and the average vulnerability

5 结论

本研究基于西南山地特殊的地理国情和生态环境特征,引入了大尺度景观格局指数和极端气候指数进而构建了西南喀斯特山区生态系统脆弱性评价体系,最终分析了该区的脆弱性时空变化分异格局,并初步探讨了生态系统脆弱性变化驱动机制,研究结果发现:

(1)西南喀斯特山区的生态系统则属于轻-中度脆弱,其分布格局表现为以川滇黔为核心向周边减小的趋势。

(2)2000—2013 年,西南喀斯特山区的生态系统脆弱性表现为先增加后减小的趋势:2000—2005 年,生态系统脆弱性表现出一定程度的增加,而 2005—2010 年和 2010—2013 年生态系统脆弱性均表现一定程度的减小。

(3)近 13 年西南喀斯特山区的生态系统脆弱性时空变化格局受人类活动(不同产业 GDP 和人口密度)、降水等因素影响较为显著。

参考文献(References):

[1] Gabor T, Griffith T K. The assessment of community vulnerability to acute hazardous materials incidents. Journal of Hazardous Materials, 1980, 3(4): 323-333.

[2] Tinkham W T, Hoffman C, Falkowski M J, Smith A M S, Link T E, Marshal H P. A methodology to characterize vertical accuracies in lidar-derived products at landscape scales. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2013, 79(8): 709-716.

[3] 魏建兵, 肖笃宁. 黑土侵蚀区生态重建的景观结构与功能分析. 应用生态学报,2005, 16(9): 1699-1750.

[4] 赵慧霞, 吴绍洪, 姜鲁光. 自然生态系统响应气候变化的脆弱性评价研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(2): 445-450.

[5] 吴绍洪, 戴尔阜, 黄玫, 邵雪梅, 李双成, 陶波. 21 世纪未来气候变化情景(B2)下我国生态系统的脆弱性研究. 科学通报, 2007, 52(7): 811-817.

[6] 孙志高, 刘景双. 三江自然保护区湿地生态系统生态评价. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(1): 43-48.

[7] Shi Z S, Chen L D, Hao J P, Wang T W, Cai C F. The effects of land use change on environmental quality in the red soil hilly region, China: a case study in Xianning County. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 150(1/4): 295-306.

[8] 刘振乾, 刘红玉, 吕宪国. 三江平原湿地生态脆弱性研究. 应用生态学报, 2001, 12(2): 242-244.

[9] 姚建, 艾南山, 丁晶. 中国生态环境脆弱性及其评价研究进展. 兰州大学学报: 自然科学版, 2003, 39(3): 77-80.

[10] 孔博, 陶和平, 李爱农, 刘斌涛. 汶川地震灾区生态脆弱性评价研究. 水土保通报, 2010, 30(6): 180-184.

[11] 李平星, 樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价——以广西西江经济带为例. 自然资源学报, 2014, 29(5): 779-788.

[12] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 屈双荣. 西南岩溶山地生态脆弱性研究. 中国岩溶, 2002, 21(1): 25-29.

[13] 张笑楠, 王克林, 张伟, 陈洪松, 何寻阳. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性. 生态学报, 2009, 29(2): 749-757.

[14] 何冬晓. 重庆典型岩溶山地生态环境脆弱性分析及生态重建探讨[D]. 重庆: 西南大学, 2008.

[15] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 77-79.

[16] 刘新卫,周华荣. 基于景观的区域生态环境质量评价指标体系与方法研究——以塔河中下游典型区为例. 水土保持研究,2005, 12(2): 7-10.

[17] Li A N, Wang A S, Liang S L, Zhou W C. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS——a case study in the upper reaches of Minjiang River, China. Ecological Modelling, 2006, 192(1/2): 175-187.

[18] Guo B, Zhou Y, Zhu J F, Liu W L, Wang F T, Wang L T, Yan F L, Wang F, Yang G, Luo W, Jiang L. Spatial patterns of ecosystem vulnerability changes during 2001-2011 in the three-river source region of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Journal of Arid Land, 2016, 8(1): 23-25.